

УДК 631.352:631.311.5

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАПЕЦИЕВИДНЫХ НОЖЕЙ  
НА РОТОРНЫХ КОСИЛКАХ

канд. техн. наук, доц. Е.И. МАЖУГИН; канд. техн. наук, доц. С.Г. РУБЕЦ;  
канд. техн. наук, доц. А.В. ПАШКЕВИЧ  
(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)

*Исследуется взаимодействие ножей роторной косилки с растительностью. Анализируется влияние скорости рабочего передвижения косилки при рассмотрении процесса отклонения ножей от радиального положения во время скашивания. На основе теоретического анализа схем взаимодействия ножа со срезаемой растительностью обосновано использование ножей трапецевидной формы. Приведена схема взаимодействия трапецевидного ножа с растительностью, учитывающая все значимые усилия, действующие в процессе срезания. На основе анализа данной схемы получены уравнения для определения угла отклонения ножей от радиального положения.*

**Ключевые слова:** роторная косилка, трапецевидные ножи, схемы взаимодействия ножа с растительностью, плоскость среза, выражения для определения угла отклонения ножа.

**Введение.** Скашивание травяной растительности на сельскохозяйственных угодьях выполняется в основном многороторными косилками. Их режущими элементами чаще всего являются прямоугольные ножи, которые шарнирно прикреплены к несущей части ротора, обычно называемой диском. Срезание растительности происходит при ударе ножа по растению. Разрушение растения в плоскости среза происходит благодаря инерции растения и высокой окружной скорости ножа. Такой способ срезания растительности называется инерционным или бесподпорным. Несмотря на широкое распространение подобных косилок и длительный опыт их практического использования круг теоретических исследований работы этих косилок ограничен, что сокращает возможности в теоретическом обосновании оптимальных параметров косилок. Особенно данное положение проявляется при использовании многороторных косилок для окашивания неудобц, обочин дорог, мелиоративных каналов и т.п. При работе роторной косилки зачастую требуется не только высокая скорость ножей, обеспечивающая качественное срезание тонкостебельной травяной растительности, но и высокая энергия воздействия ножей на жесткие стебли, срезание которых происходит за счет удара по стеблю. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего теоретического исследования взаимодействия ножей косилки с растительностью.

Существенный вклад в теоретическое и экспериментальное изучение данной проблемы внесли Е.С. Босой [1], И.Ф. Василенко [2] Е.М. Гутьяр [3], В.А. Желиговский [4], А.Ю. Ишлинский [5], В.И. Фомин [6], Б.Н. Штомпель [7] и другие. Обобщающим трудом в данной сфере можно считать собрание сочинений В.П. Горячкина [8]. Однако эти исследования посвящены роторным косилкам, у которых ротор представляет собой диск с жестко прикрепленными к нему сегментными ножами.

Работу косилок с шарнирно прикрепленными к дискам ножами изучали В.М. Мартынов [9], Н.Е. Резник [10] и другие ученые [11]. Данная проблема также исследовалась в ряде диссертационных работ [12–15].

В известных теоретических работах [9–15] предлагаются расчетные схемы, в которых значимыми и учитываемыми нагрузками, действующими на нож в процессе скашивания, считаются центробежная сила и сила сопротивления растительности срезанию. Такая схема является достаточно упрощенной и не учитывает влияния скорости рабочего передвижения косилки. Данный фактор необходимо учитывать при рассмотрении вопроса чрезмерного отклонения ножей от радиального положения. Чрезмерное отклонение ножей приводит к нарушению процесса срезания растительности и снижению эффективности работы косилки.

**Основная часть.** При проведении исследований использовался метод теоретического анализа процесса взаимодействия ножа косилки, шарнирно прикрепляемого к диску ротора, со стеблем растительности при учете окружной скорости ножей и поступательной скорости косилки.

На рисунке 1 показана схема работы многороторной косилки с нижним приводом роторов [16], где  $v_n$  – поступательная скорость перемещения режущего аппарата;  $v_o$  – окружная скорость концов ножей;  $l_n$  – величина перекрытия;  $D_p$  – диаметр ротора по концам ножей;  $B_z$  ширина захвата.

Режущий аппарат komponуется так, чтобы для отсутствия приминания растительности корпусом траектории концов ножей (см. рис. 1) пересекались за пределами контура корпуса редуктора (точки А).

Траекторией конца ножа движущейся косилки является циклоида, поэтому при каждом обороте ротора нож захватывает серповидную зону растительности.

При скашивании растительности роторной косилкой с шарнирно прикрепленными к несущей части ротора ножами могут возникнуть различные случаи или варианты перерезания растительности. Их деление по вариантам зависит от угла  $\gamma$ , образуемого вектором скорости ножа и нормальной составляющей вектора силы резания.

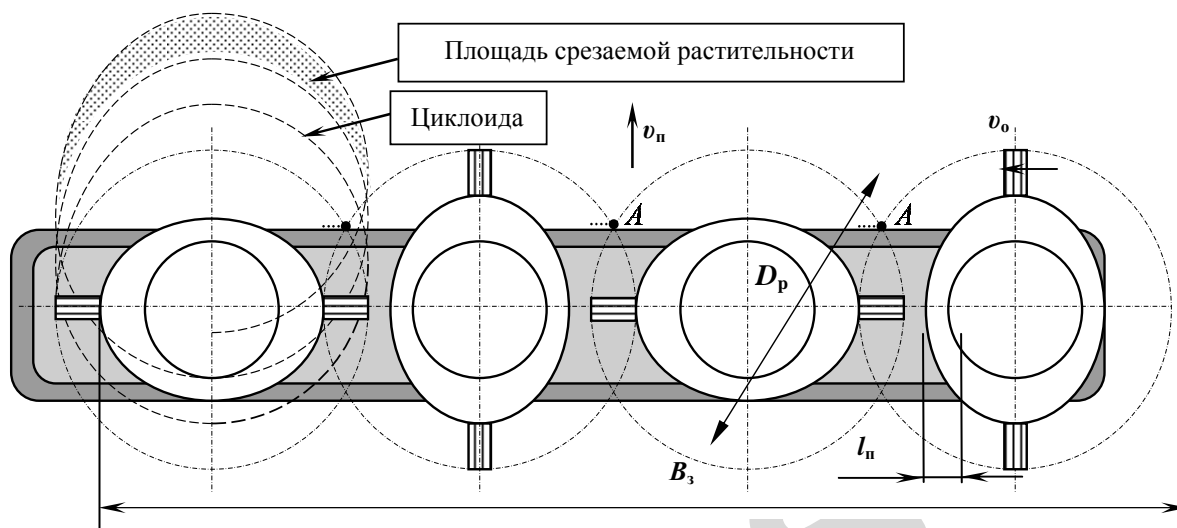


Рисунок 1 – Схема работы и параметры роторной косилки

Обычно при резании растительности рассматривают три варианта: первый – нормальное резание или рубка; второй – косое резание; третий – скользящее резание [17].

Первый вариант характеризуется тем, что вектор нормальной составляющей силы резания и вектор скорости совпадают по направлению. Второй – охватывает ситуации, при которых угол наклона вектора скорости  $\gamma$  не превышает угла трения  $\tau$  материала ножа о перерезаемый стебель.

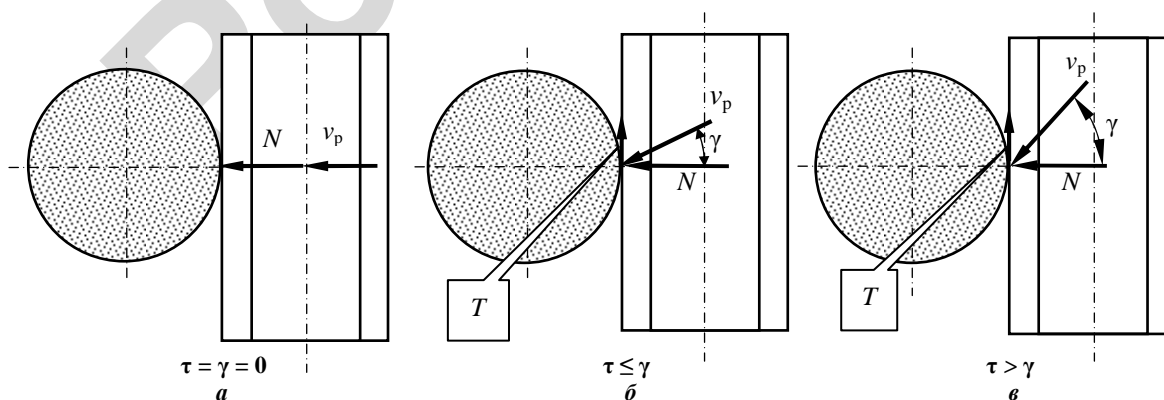
Значение угла  $\tau$  может быть определено по следующему соотношению:

$$\tau = \arctg\left(\frac{T}{N}\right), \quad (1)$$

где  $T$  – сила трения материала ножа о перерезаемую растительность;  $N$  – нормальная составляющая силы резания.

Тогда можно записать, что косому резанию соответствует неравенство  $\tau \leq \gamma$ . Скользящему резанию, т. е. третьему варианту, – неравенство  $\tau > \gamma$ .

Схематически данные случаи перерезания стеблей растений поясним на рисунке 2.



а – схема, соответствующая нормальному резанию; б – косому; в – скользящему

Рисунок 2 – Схемы перерезания стебля растения

Кроме того, необходимо пояснить, что по ориентации плоскости среза по отношению к оси растения различают перпендикулярное и наклонное резание. Нормальное резание, или рубка, является частным случаем перерезания растений. Оно может иметь место только при условии, что  $v_n = 0$  или  $v_n$  и  $v_o$

совпадают, или противоположны по направлению. Это возможно только при входе ножа в зону резания и при выходе из нее. Но при работе косилки скорость  $v_n$  не может быть равна нулю, а конструктивно у многороторных косилок, имеющих перекрытие траекторий концов ножей, скорости  $v_n$  и  $v_o$  не могут совпадать или иметь противоположное друг другу направления. Поэтому в данном случае вариант нормального резания рассматривать не имеет смысла. При косом или скользящем резании на режущей кромке возникает сила трения, направленная вдоль кромки и создающая момент, стремящийся отклонить нож от радиального положения. Отклонения ножа меняют угол между вектором скорости резания и нарушают процесс резания.

При работе роторной косилки угол наклона вектора скорости резания является величиной непостоянной, зависящей от окружной скорости ротора  $v_o$  и скорости рабочего передвижения косилки  $v_n$ . На рисунке 3 приведены схематически кинематические соотношения при перерезании стебля растения ножом роторной косилки.

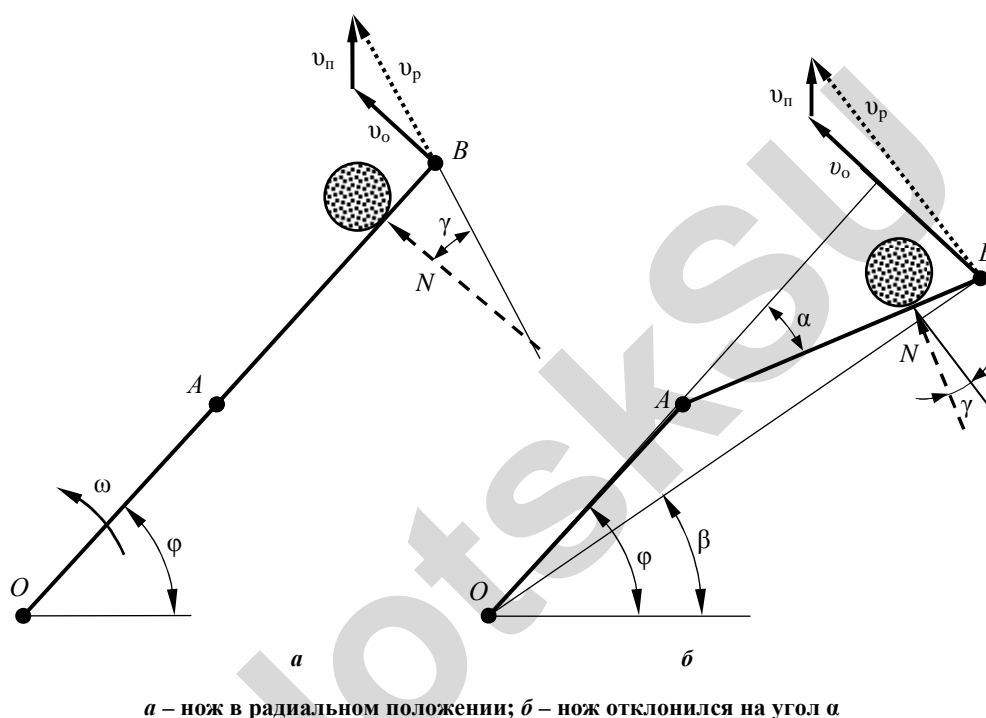


Рисунок 3 – Схемы кинематических соотношений при перерезания стебля растения

Нож в данном случае упрощенно представлен в виде стержня длиной  $AB$ . При отсутствии сопротивления срезанию растительности нож занимает радиальное положение (рис. 3, а). Для этого случая геометрическое сложение векторов  $v_o$  и  $v_n$  дает выражение для расчета  $v_p$ :

$$v_p = \sqrt{v_o^2 + v_n^2 + 2 v_o v_n \cos \varphi}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол поворота ротора от исходного положения, соответствующего горизонтальному положению  $OA$  и  $AB$ .

Значение  $\varphi$  определяется как

$$\varphi = \omega \cdot t, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость ротора, рад/с;  $t$  – рассматриваемый промежуток времени поворота ротора, с.

На основании теоремы синусов можно записать

$$\sin \gamma = (v_n \sin \varphi) / v_p. \quad (4)$$

Для скользящего резания требуется выполнение условия  $\tau > \gamma$ .

Тогда

$$\sin \tau > \frac{v_n \sin \varphi}{\sqrt{v_o^2 + v_n^2 + 2 v_o v_n \cos \varphi}}. \quad (5)$$

После некоторых преобразований получим

$$\sin \tau \sqrt{v_o^2 + v_n^2 + 2 v_o v_n \cos \varphi} > v_n \sin \varphi. \quad (6)$$

Введем следующее соотношение

$$v_o = a v_n, \quad (7)$$

где  $a$  – соотношение между окружной и поступательной скоростями.

Подставим в уравнение (6) вместо  $v_o$  его выражение из соотношения (7):

$$\sin \tau \sqrt{(a^2 + v_n^2 + v_n^2 + 2a v_n^2 \cos \varphi)} > v_n \sin \varphi. \quad (8)$$

Разделив обе части неравенства (8) на  $v_n$ , имеем

$$\sin \tau \sqrt{a^2 + 1 + 2a \cos \varphi} > \sin \varphi. \quad (9)$$

После некоторых преобразований получим

$$a^2 + 2a \cos \varphi + 1 - (\sin^2 \varphi) / \sin^2 \tau > 0. \quad (10)$$

Из неравенства (10) следует, что вид резания зависит от соотношения окружной скорости ножей и поступательной скорости косилки, угла трения лезвия ножа о перерезаемую растительность и угла поворота ротора. По форме неравенство является квадратным неравенством. Тогда его решение относительно соотношения  $a$  будет иметь вид

$$a > -\cos \varphi \pm \sqrt{-\sin^2 \varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \tau}}. \quad (11)$$

По форме решения (11) видно, что дискриминант будет больше или равен нулю при изменении угла  $\varphi$  от 0 до  $\pi$  и угла  $\tau$  от 0 до  $\pi/2$ . Следовательно, неравенство (11) имеет действительные корни.

Угол трения стали о травяную растительность близок к  $40^\circ$  [18]. При подстановке этого значения в неравенство (11) установлено, что при изменении  $\varphi$  от 0 до  $\pi$  соотношение  $a$  меняется в диапазоне  $\pm 1,56$ . То есть для обеспечения резания со скольжением достаточно, чтобы окружная скорость в 1,56 раза была больше или меньше скорости рабочего передвижения. В действительности у современных косилок окружная скорость в 20...50 раз больше скорости передвижения. Это говорит о том, что срезание растительности, согласно модели, представленной на рисунке 3,  $a$ , является косым.

На основании данного рисунка можно записать следующее неравенство:

$$v_n^2 \sin^2 \tau - v_n^2 \sin^2 \varphi + 2v_o v_n \cos \varphi \cdot \sin \tau + v_o^2 \sin^2 \tau > 0. \quad (12)$$

Отсюда можно получить условие, при котором будет обеспечено резание со скольжением. Решение неравенства (12) относительно скорости рабочего передвижения косилки позволяет получить аналитическое выражение для расчета значения данной величины, при котором будет происходить резание со скольжением. После некоторых преобразований оно приводится к виду

$$v_n > \frac{-v_o \cdot \sin \tau (\cos \varphi \pm 1) \cos \tau}{\sin^2 \tau - \sin^2 \varphi}. \quad (13)$$

Однако более адекватной реальному процессу кошения является модель, представленная на рисунке 3, б. Здесь учтено то, что в процессе кошения ножи под воздействием сил сопротивления отклоняются назад против направления резания. Угол отклонения здесь обозначен как  $\alpha$ . Тогда, исходя из того, что в сравнении со схемой (рис. 3, а), уравнение (4) запишется следующим образом:

$$\sin(\alpha - \gamma) = \frac{v_n \sin \varphi}{v_p}. \quad (14)$$

Выполнив последующие действия, получим

$$v_n > \frac{-v_o \sin(\alpha - \gamma) \cdot (\cos \varphi \pm 1) \cos(\alpha - \gamma)}{[\sin(\alpha - \gamma) - \sin^2 \varphi]}. \quad (15)$$

Анализ уравнений (11), (13) и (15) показывает, что у современных многороторных косилок срезаение растительности является косым или скользящим. При этом возникающая на режущей кромке ножа сила трения, направленная вдоль режущей кромки, будет способствовать отклонению ножа от радиального положения. Уменьшение отклоняющего момента обеспечивается применением ножей, запатентованной авторами [19] формы (рис. 4).

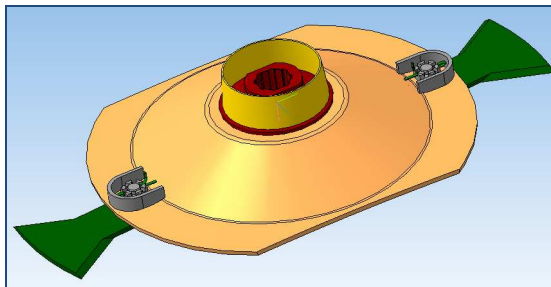


Рисунок 4 – Схема ротора с трапецевидными ножами

Режущие кромки ножей расположены радиально по отношению к отверстию для болта крепления ножа к диску и выполнены расширяющимися к периферии, а внешняя торцовая кромка изготовлена по дуге окружности с центром, совпадающим с центром ротора. Выступающая за пределы ротора часть ножа имеет форму, близкую к форме равнобедренной трапеции. Впоследствии ножи данной формы были названы трапецевидными ножами [20].

Вращающийся вместе с ротором, шарнирно присоединенный к нему нож благодаря действию центробежных сил располагается в радиальном положении. При встрече с растительностью нож срезает ее заостренной режущей кромкой. Возникающая при этом сила сопротивления, действующая на режущую кромку со стороны растительности, отклоняет нож назад против направления вращения. Возникающее скольжение режущей кромки по скашиваемой растительности не приводит к увеличению отклонения ножа, поскольку сила трения режущей кромки о растительность не создает отклоняющего нож момента вследствие того, что плечо силы трения относительно центра отверстия в пластине равно нулю, так как режущая кромка расположена радиально. Поскольку выступающая за пределы диска трапецевидная часть ножа выполнена расширяющейся к периферии, центр масс ножа также смещен к периферии, что увеличивает плечо центробежной силы, действующей на нож, и тем самым способствует стабилизации его положения.

Во избежание трения внешней торцовой кромки о нескошенную растительность кромка изготовлена по дуге окружности с центром, совпадающим с центром ротора, и при срезании растительности некоторое отклонение ножа приводит к соответствующему повороту внешней кромки и удалению ее нерабочей части от несрезанной растительности. Все это позволяет повысить динамическую устойчивость ножа благодаря тому. Кроме того, поскольку нож выполнен расширяющимся к периферии, он имеет большую массу, и к тому же его центр масс более удален от центра болта крепления к ротору, соответственно и его момент инерции также больше, чем у прямоугольного ножа.

Проведенные ранее теоретические исследования [21] позволили обосновать схему (рис. 5), которая учитывает все значимые усилия, действующие на нож роторной косилки при срезании травянистой и древесно-кустарниковой растительности, такие как:  $F_p$  – сила сопротивления срезанию, действующая на режущую кромку ножа со стороны стебля растительности, Н;  $F_{тр}$ ,  $F_{тр.с}$  – соответственно силы трения режущей кромки о растительность и трения плоскости ножа о стержень, Н;  $F_{ц.б.}$ ,  $F_{ин}$  – соответственно центробежная сила и сила инерции, препятствующая отклонению ножа, Н;  $F_x$ ,  $F_y$  – составляющие реакции в шарнире, направленные по осям  $X$  и  $Y$  соответственно, Н;  $R_{ш}$  – суммарная реакция в шарнире, Н;  $M_{тр}$  – момент сил трения в шарнире, Н·м;  $I_{ин}$  – момент инерции, препятствующий повороту ножа, кг·м<sup>2</sup>.

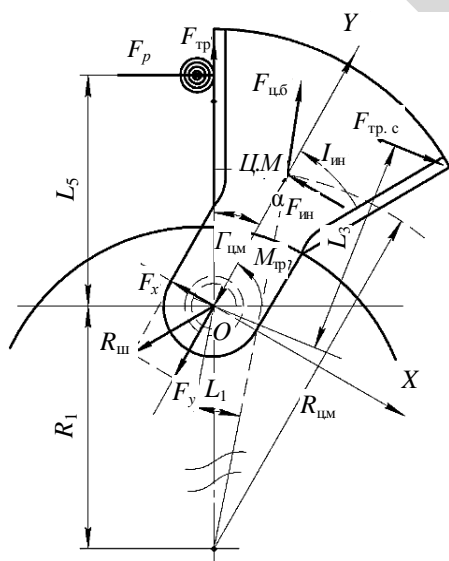


Рисунок 5 – Схема взаимодействия трапецевидного ножа с растительностью

В результате анализа процесса взаимодействия ножа со стеблем растительности [20] получено выражение для определения угла отклонения ножа от радиального положения для прямоугольных ножей:

$$\alpha = \arcsin \frac{F_p (L_5 + f \cdot L_2) - I_{ин} \cdot \varepsilon}{m_n \cdot \omega_n^2 \cdot r_{ц.м} (f_1 \cdot r + R_1)}, \quad (16)$$

где  $L_5$  и  $L_2$  – плечи действия сил, м;  $f$  и  $f_1$  – коэффициенты трения ножа о растительность и трения в шарнире соответственно;  $\varepsilon$  – угловое ускорение ножа, рад/с<sup>2</sup>;  $m_n$  – масса ножа, кг;  $\omega_n$  – угловая скорость ножа, рад/с;  $r_{ц.м}$  – расстояние от оси крепления ножа до центра масс ножа, м;  $r$  – радиус отверстия под болт крепления ножа к ротору, м;  $R_1$  – расстояние между осью вращения ротора и осью поворота ножа, м.

Формула (16) показывает, что величина угла отклонения ножа от радиального положения зависит от геометрических размеров, массы ножа, момента инерции ножа относительно оси крепления, а также расстояния, на котором находится центр масс ножа относительно оси крепления к ротору. Ножи с более удаленным центром масс и большим моментом инерции будут отклоняться на меньший угол.

Тогда уравнение, позволяющее определить угол отклонения трапецевидного ножа от радиального положения, запишется в следующем виде:

$$\alpha = \arcsin \frac{F_p \cdot L_5 - I_{ин} \cdot \varepsilon}{m_n \cdot \omega_n^2 \cdot r_{ц.м} (f_1 \cdot r + R_1)}. \quad (17)$$

Уравнение (17) показывает, что использование ножа предлагаемой конструкции позволяет повысить динамическую устойчивость ножа.

Таким образом, можно предположить, что нож предлагаемой конструкции в процессе срезания будет отклоняться на меньшую величину по сравнению с ножом прямоугольной формы. Проведенные лабораторные исследования и производственные испытания [20] подтвердили данное предположение.

**Закключение.** У современных многороторных косилок срезание растительности является в основном косым или скользящим. Возникающая на режущей кромке ножа сила трения, направленная вдоль режущей кромки, способствует отклонению ножа от радиального положения. Уменьшение отклоняющего момента обеспечивается запатентованным авторами трапецевидным ножом. На основании расчетной схемы, учитывающей все значимые усилия, действующие на нож роторной косилки при срезании растительности, получены выражения для определения угла отклонения ножа от радиального положения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Босой, Е.С. Скорость резания стеблей сельскохозяйственных культур / Е.С. Босой // Сельхозмашина. – 1953. – № 4. – С. 12–13.
2. Василенко, И.Ф. Теория режущих аппаратов жатвенных машин / И.Ф. Василенко // Труды ВИСХОМ. – М., 1937. – Сб. 5. – С. 7–114.
3. Гутьяр, Е.М. К теории резания стеблей / Е.М. Гутьяр // Сельскохозяйственные машины. – 1931. – № 7. – С. 12–13.
4. Желиговский, В.А. Экспериментальная теория резания лезвием / В.А. Желиговский // Труды МИМЭСХ. – М., 1940. – Вып. IX. – С. 27.
5. Ишлинский, А.Ю. Задача о скорости косыбы злаков / А.Ю. Ишлинский // Сельскохозяйственная машина. – 1937. – № 5–6. – С. 9–10.
6. Фомин, В.И. Обоснование параметров косилочного режущего аппарата сегментно-дискового типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.И. Фомин. – Ростов н/Д, 1963. – 22 с.
7. Штомпель, Б.Н. Исследование технологического процесса кошения трав ротационными косилками / Б.Н. Штомпель. – Минск: Изд-во Акад. с.-х. наук БССР, 1961. – 51 с.
8. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3. – 384 с.
9. Мартынов, В.М. Геометрия ножа ротационного режущего аппарата / В.М. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 3. – С. 34–36.
10. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
11. Jonson, C.E. Horizontal rotary mower blade dynamics / C.E. Jonson, W.D. Robinson, J.L. Turner // TRANSACTIONS of the ASAE. – 1984. – Bd. 27, № 6. – P. 1666–1668.
12. Каифаш, Ф. Обоснование динамических параметров и режима работы ротационного режущего аппарата: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ф. Каифаш. – М.: Моск. ин-т инж. с.-х. пр-ва им. В.П. Горячкина, 1982. – 158 с.

13. Карпенко, М.И. Обоснование оптимальных технологических параметров ротационного режущего аппарата косилок с пониженной скоростью ножей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.И. Карпенко. – Глеваха, 1984. – 17 с.
14. Погорелец, А.Н. Технологические и технические основы совершенствования ротационного режущего аппарата уборочных машин: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Погорелец; Украин. с.-х. акад. – Киев, 1975. – 18 с.
15. Смирнов, Г.А. Обоснование параметров унифицированного ротационного режущего аппарата машин для кошения: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Г.А. Смирнов. – М., 1988. – 177 с.
16. Мажугин, Е.И. Машины для эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов: учеб. пособие / Е.И. Мажугин. – Горки: БГСХА, 2010. – 333 с.
17. Завражнов, А.И. Механизация приготовления и хранения кормов / А.И. Завражнов, Д.И. Николаев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 336 с.
18. Васильев, Б.А. Мелиоративные машины / Б.А. Васильев, В.Б. Гантман, В.В. Комиссаров; под общ. ред. И.И. Мера. – М.: Колос, 1980. – 351 с.
19. Нож роторной косилки: пат. 16507 Респ. Беларусь, МПК A01D 34/01 / В.А. Шаршунов, Е.И. Мажугин, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с.-х. акад. № u 20090720; заявл. 19.05.09; опубл. 30.10.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5 – С. 44.
20. Рубец, С.Г. Скашивание древесно-кустарниковой растительности на мелиоративных объектах много-роторной косилкой с трапециевидными ножами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Г. Рубец. – Минск: НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2013. – 154 с.
21. Мажугин, Е.И. Обоснование расчетной схемы ножей мелиоративной много-роторной косилки / Е.И. Мажугин, С.Г. Рубец // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 25–26 авг. 2010 г. / РУП «НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П.П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 40–43.

Поступила 22.12.2015

#### JUSTIFICATION FOR USE TRAPEZOIDAL BLADES ON ROTARY MOWERS

**E. MAZHUGIN, S. RUBEC, A. PASHKEVICH**

*In the paper substantiates the necessity of theoretical investigation the interaction of a rotary mower blades with vegetation. It demonstrated the need to address the impact of the speed of movement of the working mower when considering the process of deviation from the radial position of the blades during mowing. Based on the theoretical analysis of patterns of interaction knife with cut vegetation substantiates the necessity of the use of knives trapezoidal shape. It was shown the scheme of interaction trapezoidal blade with vegetation, taking into account all relevant existing efforts in the process of cutting. On the basis of analysis of the scheme derived the equations for determining the angle of deviation from the radial position.*

**Keywords:** rotary mower, trapezoidal knives, scheme of interaction trapezoidal knife with vegetation, shear plane, equations for determining the angle of deviation of knife.